



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

BİR SICAK SU DEPOLAMA TANKININ ŞARJ ve DEŞARJ İŞLEMLERİNDE ISIL TABAKALAŞMA DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

MUSTAFA WAHBY KANBAR JABER
KERKÜK ÜNİVERSİTESİ

UTKU ŞENTÜRK
EGE ÜNİVERSİTESİ

AYTUÇ EREK
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

ALİ GÜNGÖR
EGE ÜNİVERSİTESİ

BİR SICAK SU DEPOLAMA TANKININ ŞARJ VE DEŞARJ İŞLEMLERİNDE ISIL TABAKALAŞMA DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa WAHBY KANBAR JABER
Utku ŞENTÜRK
Aytunç EREK
Ali GÜNGÖR

ÖZET

Isıl tabakalaşmalı sıcak su depolama tankları (akümülatör), ısıtma ve evsel güneş enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl tabakalaşma, mevcut enerji kaynağı düzensiz olduğunda sistemin verimini artırmak amacıyla kullanılan etkili bir yöntemdir. Isıl tabakalaşma, depoya giriş ve çıkıştan kaynaklanan karışma, çevreye ısı kaybı ve deponun geometrisi gibi faktörlerden etkilenir. Isıl tabakalaşmalı depolama tanklarının tasarımında deneysel ve sayısal (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD) yöntemlere başvurulmaktadır. Akümülatörden şarj ve deşarj işlemlerinde sıcaklık tabakalaşmasının uzun kullanım sürelerinde en az etkilenmesi ve kullanım suyunun çok az değişikliklerle sağlanıyor olması amaçlanır. Bu nedenle sayısal modellemelerde bu etkilerin araştırılması önem arz eder. Bu çalışmada, 250 L hacme sahip, helisel serpantinli, dikey bir akümülatörün içindeki ısı tabakalaşma, HAD ile incelenmiştir. HAD simülasyonlarında, 5 saatlik şarj ve deşarj durumu ele alınmıştır. Farklı serpantin giriş sıcaklığı ve debilerinde, sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır. Bulgular, literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırılarak yöntemin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Buna göre referans alınan Zachar vd. (2003) tarafından verilen sonuçlara kıyasla, yüzde bağıl hata, % 2'nin altında bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Isıl tabakalaşma, sıcak su depolama tankı, doğal taşınım, Enerji depolama, hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

ABSTRACT

Hot water storage tanks (accumulators) with thermal stratification, is widely used in heating and domestic solar energy systems. Thermal stratification is an effective method which is used to increase the efficiency of the system when the existing energy sources is uneven. Thermal stratification is influenced by factors such as, mixing in the tank resulting from the inlet and outlet, the geometry of the tank and heat loss from storage to the environment. Thermal stratification in the design of the storage tank can be obtained utilizing experimental and numerical (Computational Fluid Dynamics, CFD) methods. In the charging and discharging processes, the aim is to have the thermal stratification so that minimum changes occur in the temperature of the discharge water. Therefore, it's important to investigate these effects by numerical modeling. In this study, the thermal stratification inside a 250 L vertical hot water storage tank with an immersed heat exchanger is investigated using CFD. In CFD simulations, 5-hour charge and discharge modes are taken into consideration. Temperature fields are obtained for different inlet temperatures and flow rates. The results are validated by comparing with the experimental data in the literature.

Key Words: Thermal stratification, hot water storage tanks, natural convection, energy storage, computational fluid dynamics

1. GİRİŞ

Enerji depolamanın anlamı, bir enerji formunun, daha sonra faydalı bir işlemde kullanılmak üzere saklanmasıdır. Enerji ve enerjinin depolanması, mühendisliğin en önemli konularından biridir. Enerji üretimi veya tüketimi, enerjinin temin edildiği kaynağa bağlı olarak süresiz olabilir. Enerjinin depolanmasında, hem enerji girişi hem de yük değişken ise, bu durumda tercih edilebilecek iki seçenek vardır; Birincisi enerji ihtiyacını enerji girişine uydurmak, ikincisi ise enerjiyi daha sonra kullanmak üzere depolamaktır. Isı kaynağı miktarı ve enerji ihtiyacı arasında oluşabilecek farklılık ısı enerji depolama yöntemi ile çözülebilir. İhtiyaç duyulan ısı miktarı ile yenilenebilir enerji kaynağından elde edilebilecek ısı miktarı arasındaki farkın derecesi uygulanacak depolama yöntemini ve depolanacak ısı miktarını belirler.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması ile ilgili temel sorunlarından biri'de, enerjinin nasıl depolanacağıdır. Günümüzde bu sorun etkin ve ucuz ısı depolama (akümülatör) sistemlerinin geliştirilmesi ile çözüme kavuşturulmaya çalışılmaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri (akümülatörler) üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Bu sistemlerin temel özellikleri; yüksek depolama kapasitesi, yüksek şarj-deşarj verimi, kayıp kapasitesi az olması, uzun ömürlü olması, ucuz, enerji yoğun olması, depolama ünitesinde ısı tabakalaşma, ısı ilavesi veya tahliyesi için güç gereksinimi, çalışma sıcaklık aralığı olarak sayılabilir.

Abdoly ve Rapp [1] tarafından yapılan çalışmada, tabakalaşmış depo içinde sıcaklık düşüşü, iletim modeline göre teorik olarak hesaplanmıştır. Bu durum karışım, girdap akımları ve düşüşe yol açan diğer mekanizmaları ihmal ettiği için bir tabakalaşmış ısı hatlı depolama tankının performansı için bir üst limit oluşturmaktadır. Hesaplama her boyut, sıcaklık ve yalıtım seçimi için yapılabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre; yalıtımdan havaya taşınım ile olan ısı transferi ısı hat boyunca iletimle olan ısı transferinden daha büyük ısı kaybına yol açmaktadır. Bu çalışmada statik ve dinamik modların da deneyleri gerçekleştirilmiştir. Statik mod deneylerinde sabit bir ısı hat elde edilmiş ve ısı hattın üstünde ve altında belli aralıklarla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Isıl hattın oluşması sırasında bir miktar karışma meydana çıkmış, bu da hesaplamalarda yer almayan bir genişlemeye yol açmıştır. Bunun dışında, ısı hattın yayılmasının iletim modeli ile hesap edilmiş olandan çok az miktarda farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha ince duvarlara sahip bir tankın kullanılmış olması durumunda, deneyler ve teorik hesaplamalar arasında uyum olacağı belirtilmiştir. Dinamik deneyler hem aşağı hem de yukarı yönde hareket eden bir ısı hat ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar başlangıçtaki ısı hattın 0,2 ft/dak'nın altındaki doğrusal hızlarda mükemmel bir şekilde korunduğunu göstermiştir.

Mo ve Miyatake [2], sıcak su depolama tanklarında oluşan türbülanslı akışlı ısı tabakalaşma üzerine sayısal çalışma yapmışlardır. Çalışma, sıcak akışkan ile soğuk akışkanın yer değiştirmesi ile oluşan türbülanslı akış alanının tankdaki ısı tabakalaşmaya etkisini içermektedir. Türbülanslı akış alanını "Quick" metodu ile çözmek için iki boyutlu enerji eşitlikleri kullanılmıştır. Enerji eşitliliğin çözümünde kullanılan "Quickest" ve "Upwind" metodlarının zamana bağlı akış ve sıcaklık alanlarının üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Deneysel sonuçlar ile birlikte sunulan sayısal yaklaşım sonuçlarının karşılaştırılması ısı depolama tanklarındaki ısı tabakalaşma karakteristiklerinin tayinini sağlamıştır.

Haller vd. [3], tarafından yapılan bir çalışmada ısı enerji deposunun tabakalaşma verim hesabı için termodinamiğin ikinci yasasına dayanan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Isı kaybı etkisi, deneysel ve teorik olarak ortaya konmuştur. Buna göre, teorik olarak, tabakalaşma verimin entropiye veya ekserjiye bağlı olarak hesaplanması, bir fark oluşturmamaktadır. Pratikte ekserji dengesi, hesap belirsizliklerinden daha az etkilenir. Ayrıca entropi dengesi kullanımı da tavsiye edilmemektedir. Bu çalışmada şarj-deşarj ve bekleme işlemlerini içeren deney sonuçlarından elde edilmiş olan tabakalaşma verimlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu da direk olarak şarj vedeşarj edilen bir depolama tankının karışma davranışları hakkında anlamlı fikirler vermektedir. Yeni yöntem, ısı enerji depolarının ve depo bileşenlerinin tabakalaşma verimlerinin karşılaştırılması konusunda büyük bir potansiyele sahiptir.

Geczy ve Farkas [4], tarafından yapılan bir çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan bir ısı enerji deposundaki, tabaka sıcaklıklarının modellenmesi için Yapay Sinir Ağları'na dayanan (YSA) bir model tanıtılmıştır. Bu modelleme yerel sıcak su sisteminin ölçülmüş değerlerine dayanarak yapılmıştır. Sekiz eşit parçaya bölünmüş tankın içindeki dikey yöndeki sıcaklık dağılımı; depolama

tankı sıcaklığının beş dakikalık ortalaması, çevre sıcaklığı, güneş ışınımı, toplayıcının devre debisi, tabakaların sıcaklığı ve yük sıcaklığı verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Tanıtılan YSA modeli, yükleme süreleri ve yükler arasındaki dönemlerini açıklayan iki bölümden oluşmaktadır. Tanımlanan model çalışma süresi boyunca kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Ortalama sapma değeri çalışma boyunca 0,22 °C, doğrulama boyunca da 0,24 °C olarak bulunmuştur.

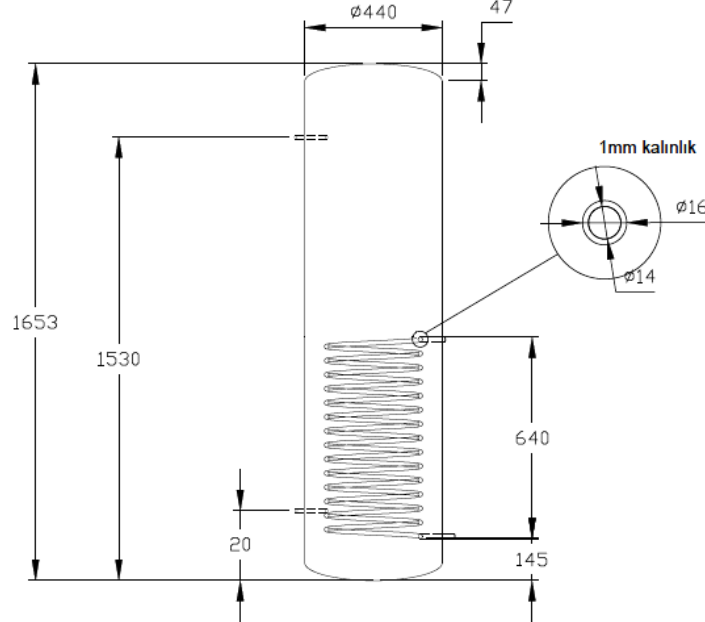
Darci vd. [5], tarafından yapılan çalışmada, yatay bir silindirik depolama tankı içindeki üç boyutlu sıcaklık ve hız alanlarının sayısal analizi yapılmıştır. Çalışmada laminer doğal taşınım olayı ve sıcaklığın dikey tabakalaşması dikkate alınmıştır. Geliştirilen üç boyutlu zamana bağlı sayısal kodla sonlu hacimler yöntemi, enerji ve momentum denklemleri ile çözülmüştür. Tankın içindeki deşarj işlemleri boyunca, tabakalaşmalı sıcaklık profillerinin deneysel olarak elde edilen sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çeşitli simülasyonlara dayanarak, tankın içindeki ısı tabakalaşmanın derecesini belirlemek için ısı ve geometrik parametrelere dayanan bir korelasyon önerilmiştir. Bu korelasyona dayanarak zamanla oluşan sıvı sıcaklık profillerini tahmin etmek için bir ifade önerilmiştir. Bu bilgiler, akışkanın ısı tabakalaşma derecesi ile global veriminin arttığı sistemler ve güneş enerjili termosifon sistemleri gibi pek çok uygulamada oldukça önemlidir. Başka bir uygulamada tank direkt olarak güneş kolektörüne bağlanmıştır. Bunun amacı, giriş jetinin önünde engelleme levhası olması ve olmaması durumundaki giriş jet pozisyonunun ısı tabakalaşmanın korunumuna etkisinin araştırılmasıdır. Sonuçlar, bölme plakasının giriş jetine yakın hız ve sıcaklık alanlarını değiştirerek daha iyi bir ısı tabakalaşmaya izin verdiğini göstermiştir. Ayrıca uygun giriş jet pozisyonunun seçimi daha etkili bir ısı tabakalaşma oluşumunu sağlamıştır. Depolama tankının bu tür iç dinamikleri ve bazı diğer yönleri ortaya konmuş ve tartışılmıştır. Çalışılan durumlarda, üst tarafın yanındaki giriş jeti daha büyük bir ısı tabakalaşma yol açmıştır. Bununla birlikte, jet giriş sıcaklığı uzun bir süre boyunca sabit kalır ve sıcaklığı bu nedenle aynı yükseklik için tanktaki suyun sıcaklığına yaklaşırsa, elde edilen sıcaklık profillerinin girişinin çapın 2/3'ü yüksekliğine yerleştirilmesi durumundakiyle benzer hale geldiği görülmüştür.

Pektemir vd. [6], tarafından sunulan sayısal çalışmada, mantolu sıcak su tankı içerisine farklı geometrik şartlarda yerleştirilen iki engelin, tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasını nasıl etkilediği nümerik olarak incelenmiştir. Engel olarak sabit boyutlarda düz silindirik ve ortası delik silindirik engel tipleri seçilmiştir. Bunların tanka ve birbirlerine göre mesafeleri değiştirilerek yirmi farklı geometrik form için çözümlenmeler yapılmıştır. Yaptığı nümerik çalışmada, en iyi sıcaklık tabakalaşmasının sağlandığı geometrik şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizlerde iki engel yerleştirilerek, en iyi tabakalaşmanın, birinci engelin tank tabanına yakın olduğu ve birinci engel ile ikinci engel arasındaki mesafenin 100 mm civarında olduğu geometrik şartlarda gerçekleştiği sonucuna elde edilmiştir.

Devore vd [7], tarafından sunulan araştırmada, bir dikey silindirik sıcak su deposu tasarlanmış ve içinde dikey serpantin, bölme ve termal diyet yerleştirilmiştir. Termal diyetler, pasif cihazlardır ve kaldırma kuvveti (Buoyancy) ve doğal taşınım nedeniyle yukarı doğru yükselen sıcak suyun yoğunluk farkı nedeniyle karıştırmasını engellemek için kullanılmaktadır. Sayısal çalışmalarda engelleyici levhanın pozisyonu ve diyet sayısı değiştirilerek simülasyonlar yürütülmüştür. Sayısal ve deneysel sonuçlardan, optimum bir tasarım elde edilerek, iki bölme levhası ve dört diyet belirli mesafelerde depo içerisine yerleştirilmiştir. Buna ek olarak termal diyetlerin uzunluğu ve çapının sıcaklık dağılımını büyük ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır. Termal diyetler ve bölümleri doğal taşınım akımlarını kolaylaştırmak ve etkisinden yararlanarak tabakalaşmayı uzun süre korumak için kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar bölme levhaların ve diyetlerin tasarlanan depo içerisine konulmasının sıcaklık tabakalaşmasını ve su ısıtma sistemlerindeki verimi arttırdığını kanıtlanmıştır.

Taheri [8], yaptığı sayısal çalışmada, absorpsiyonlu ısı pompası sisteminde bulunan ısı depolama tankında meydana gelen şarj işlemini incelemiştir. HAD simülasyonu ile depo boyutları, sıcak su giriş debisi ve sıcaklığının ısı tabakalaşma üzerindeki etkisini araştırmıştır. Elde edilen HAD modeli simülasyon sonuçlarından biri referans alınarak daha önce başka birinin yaptığı deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Yapılan sayısal çalışmalarda depo içerisine üstü üste koni şeklinde olan bir tabakalaşma malzemesi konulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde depo içerisindeki malzemenin ve sıcak akışkanın giriş koşullarının soğuk akışkanda meydana gelen karışma olaylarının üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu karışma olayları en aza indirilerek ısı tabakalaşma ve ısı pompası sisteminin verimi artırılmaya çalışılmaktadır.

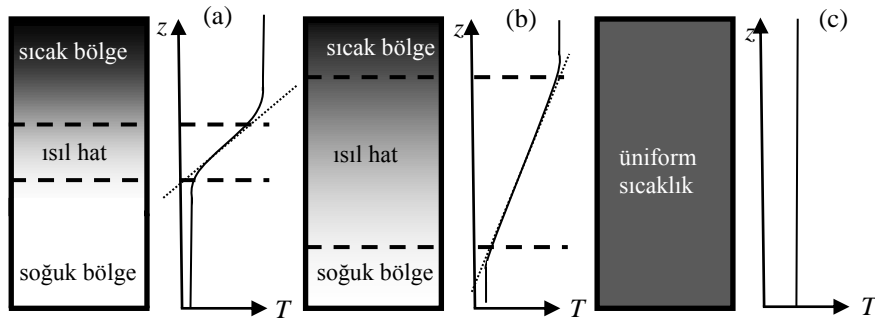
Bu çalışmada, güneş enerjisi ve ısı pompası sistemlerinde kullanılan 250 litrelik ticari bir ısı depolama tankı (Şekil 1) sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, akümülatör içerisindeki su sıcaklığının istenilen seviyeye ulaşabilmesi için gereken şarj işlemine dair, farklı giriş sıcaklıkları ve sıcak su debilerinin ısı tabakalaşmaya olan etkisinin incelenmesidir. Ayrıca kullanım esnasında soğuk su debisinin ısı tabakalaşmaya etkisi de sayısal olarak incelenmiştir



Şekil1. Sıcak su tankının kesit görünüşü ve fiziksel büyüklükleri

2. ISIL TABAKLAŞMA

Isıl tabakalaşmanın oluşma nedeni, akışkan içinde var olan sıcaklık farklarından dolayı ortaya çıkan doğal taşınım mekanizmasıdır. Akışkan içindeki sıcaklık dağılımı, yoğunluğun konuma göre değişkenlik göstermesine sebep olur. Yoğunluk farklarına bağlı olarak meydana gelen kaldırma kuvveti etkisi ile sıcak ve daha az yoğun akışkan yükselerek depoda bir sıcaklık gradyanı oluşturur. Böylece, tankın alt kısmı daha düşük sıcaklıkta olacak şekilde bir ısı tabakalaşma ortaya çıkar. Aynı miktarda ısı depolanmasına rağmen farklı derecelerde tabakalaşma oluşumu Şekil.2'de gösterilmiştir.[9]



Şekil 2. Aynı miktarda ısı depolanmasına rağmen, farklı sıcaklıklarda tabakalaşma oluşumu: (a) yüksek tabakalaşma (b) orta ölçekli tabakalaşma (c) hiç bir tabakalaşmanın olmadığı tam karışım durumu. [9]

3. MATEMATİKSEL MODEL

Kütlenin korunumu (süreklilik), momentum ve enerji denklemleri mevcut problemin temel denklemleridir. Sıkıştırılmaz, zamanla değişen ve Bousinesq yaklaşımı ile doğal taşınımın modellendiği bir problem için bu denklemler

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

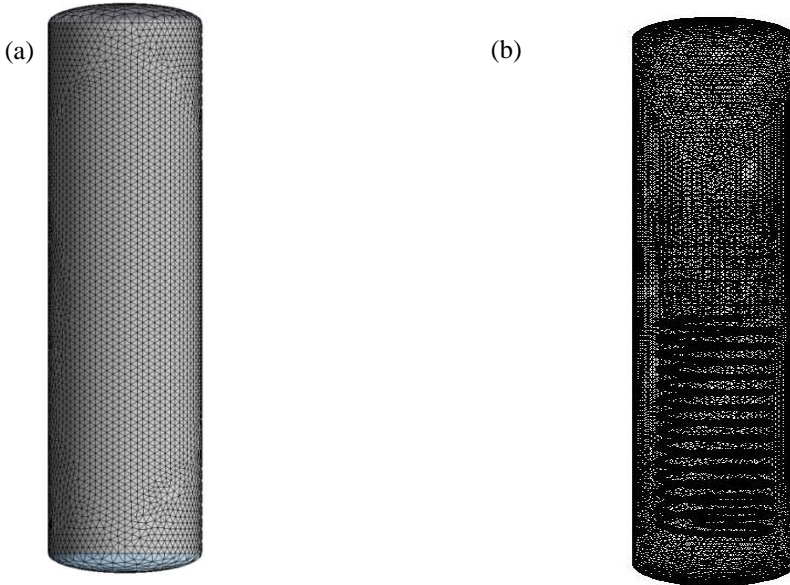
$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) - \rho \beta (T - T_0) \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla \cdot (\mathbf{V} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

Burada $\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \{ [\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T] - (2/3) \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{I} \}$ viskoz gerilme tensörü, β ısıl genleşme katsayısı, C_p akışkanın sabit basınçta özgül ısı, k ısı iletim katsayısı, T sıcaklık, ρ akışkan yoğunluğudur. Mevcut çalışmada, bu denklemlerin sonlu hacimler yöntemine dayalı sayısal çözümleri elde edilmektedir. Bu hedef doğrultusunda bir ticari yazılım olan ANSYS Fluent 14.5.7 ile HAD simülasyonları gerçekleştirilmektedir.

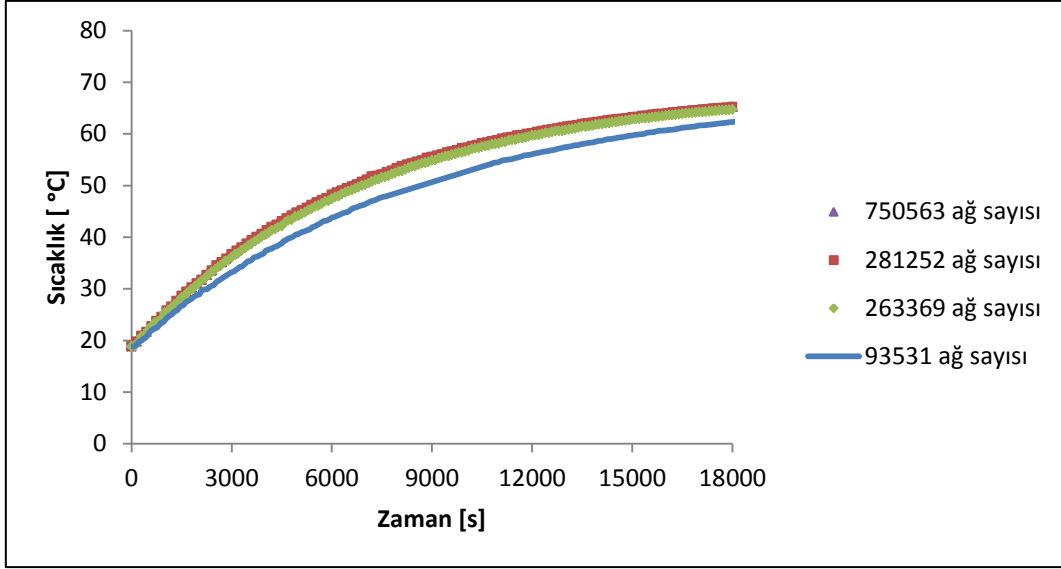
4. HAD SİMÜLASYONLARI

Çalışmada çözülecek problemin ağ oluşturulmuş geometrisi Şekil 3'te görülmektedir. Akış ve ısı transferine ilişkin parametrelerde büyük değişimlerin gerçekleştiği serpantin boru içinde, dışında ve etrafında sık ağ, deponun geri kalan kısımlarında ise daha seyrek ağ tercih edilmiştir. Problem, Kartezyen koordinat sisteminde incelenmiştir.



Şekil 3. Sıcak su depolama tankında sayısal çözüm ağ yapısı a) yüzey ağı b) iç bölge ağı

Çalışmada elde edilen sonuçların ağ sayısından bağımsızlığını göstermek için farklı ağ sayılarındaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Probleme ait bütün parametreler sabit tutularak değişik ağ sayılarında çözümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde 93531, 263369, 281252 ve 750563 sayılarında hücre sayısı değiştirilerek analizler tamamlanmıştır. Şekil 4, beş saatlik şarj süresi boyunca depolama tankının merkezinde ve 1400 mm yükseklikteki bir noktada kaydedilen sıcaklığı göstermektedir

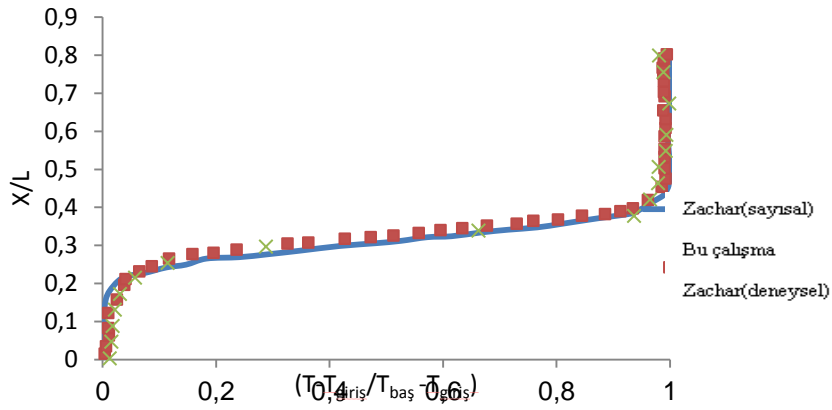


Şekil 4. Farklı ağ sayılarında, tank ekseninde 1400 mm yüksekliğe ki noktada sıcaklığın zamanla değişimi

Burada gerçek değer olarak en yüksek ağ sayısından bulunan sonuç referans olarak alınıp, diğer ağların bağıl hatası hesaplanmıştır. Buna göre ortalama bağıl hata, 263369 hücre sayısı için %1,038, 281252 hücre sayısı için ise %0,000273'tür. Hatanın küçük olduğu görülerek çalışmanın devamında bu mertebede 348600 bir ağ boyutu tercih edilmiştir.

Yapılan çözümlerde çeperlere kaymama koşulu ve adyabatiklik tanımlanmıştır. Serpantin boruların cidarlarından ısı transferi olduğu için cidarlara "cidar iletim" sınır şartı atanmış ve serpantinlere et kalınlığı 1 mm tanımlanmıştır. Şarj işlemi serpantin boruya ve deşarj işlemi depoya giriş şartı "giriş hızı", çıkış şartı ise "çıkış basıncı" olarak programa girilmiştir. Depolama tankında olan suyun sıcaklığı şarj işlemleri başlamadan önce ($t=0$) su sıcaklığı 19°C ve tankın içerisindeki akışkanın hızı sıfırdır. Sistemin çalışma basıncı ise atmosfer basıncı olan 101,325 kPa alınmıştır. Yapılan şarj analizlerde sıcak suyun serpantine giriş sıcaklıkları 70°C, 60°C ve 50°C alınmıştır. Ayrıca giriş debileri ise 2,8 L/dak, 2,5 L/dak ve 3,6 L/dak olarak alınmıştır. Deşarj analizlerde ise, depo soğuk su girişinde musluk suyunun sıcaklığı 19°C ve giriş debileri ise 5 L/dak ve 10 L/dak olarak alınmıştır. Depoda olan suyun yoğunluğu, doğal taşınımli modelleme için Boussinesq seçilip $\rho=998,275 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı $C_p=4182,75 \text{ J/kg K}$, ısı iletim katsayısı $k=0,595 \text{ W/m K}$, dinamik viskozitesi $\mu=0,01036 \text{ kg/m s}$ ve ısıl genişleme katsayısı $\beta=0,18075 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$ olarak alınmıştır. Depolama tankı içerisinde bulunan bakırdan yapılmış olan serpantin borunun yoğunluğu $\rho=8978 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı $C_p=381 \text{ J/kg K}$ ve ısı iletim katsayısı $k=387,6 \text{ W/m K}$ olarak programa girilmiştir. Kullanılan paket programda türbülanslı akışları modellemek için $k-\epsilon$ realizeable modeli seçilmiştir.

Yapılan bu sayısal çalışmanın doğruluğunun belirlenebilmesi için Zachar v.d.'nin [10] yaptığı çalışma referans olarak alınmıştır. Zachar v.d.'nin sıcaklık tabakalaşmasını elde etmek için seçtikleri fiziksel model üzerinde bu çalışmada kullanılan matematiksel model uygulanmıştır. Çözümleme yapılan modelde Zachar v.d.'nin uyguladığı olduğu aynı şartlar uygulanarak tank içerisinde aksel noktadaki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan matematiksel modelin sonuçları ile Zachar v.d.'nin bulduğu sonuçlar arasındaki karşılaştırmaya Şekil 5'te yer verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü üzere bulunan sonuç ile kaynaktan alınan sonuçlar iyi bir uyum içindedir. Böylelikle elde edilen sayısal sonuçların doğruluğu Zachar v.d.'nin yaptığı çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılarak ispatlanmıştır [10].

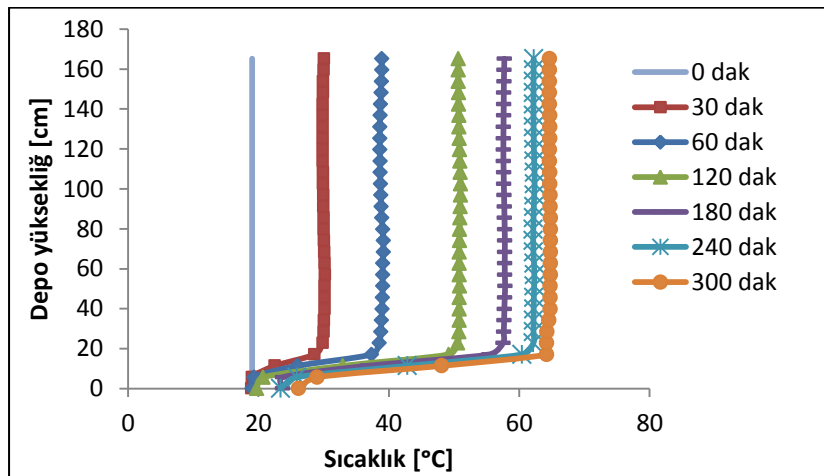


Şekil 5. Sıcak su deposu içinde 25 dakikada boyutsuz sıcaklık dağılımı ($T_{baş}=41^{\circ}\text{C}$ $T_{giriş}=20^{\circ}\text{C}$ $\dot{V}=1,6$ L/dak)

5. SAYISAL ÇÖZÜM

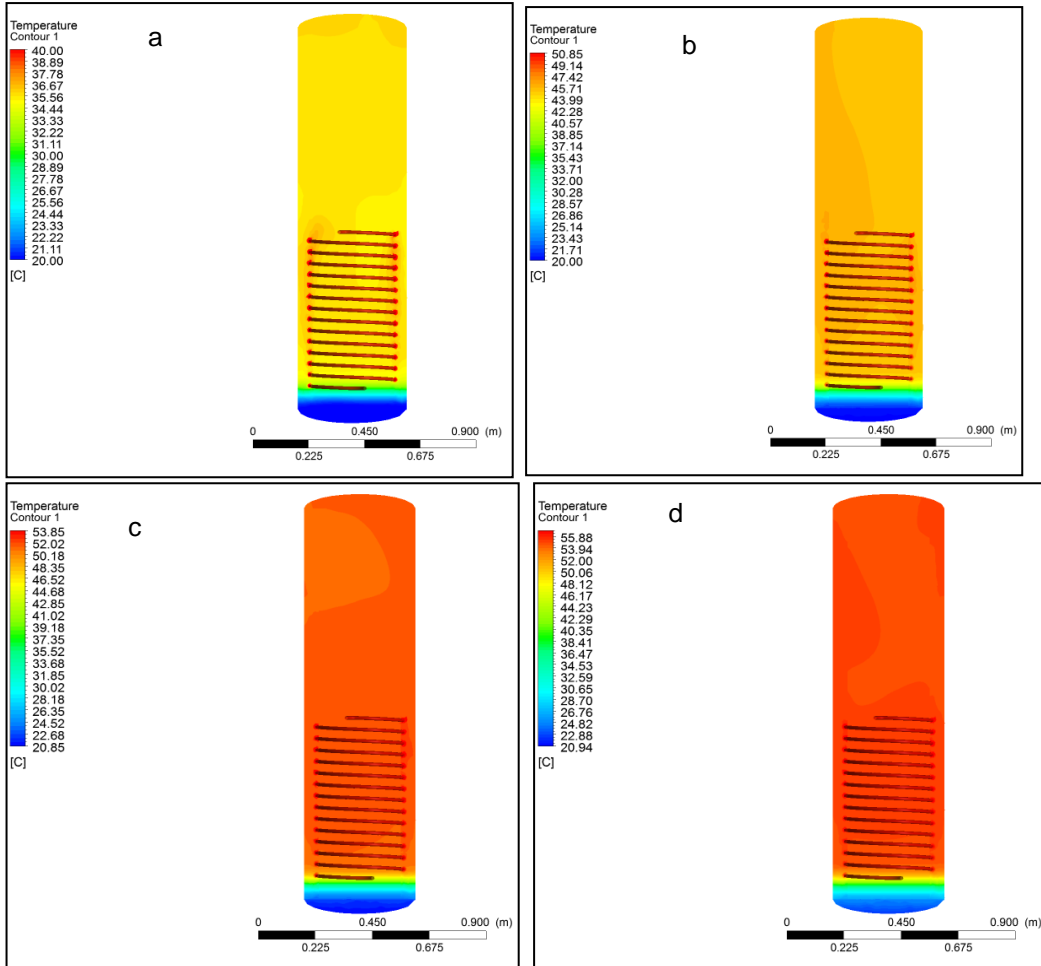
5.1 Şarj İşlemi Sabit Debide

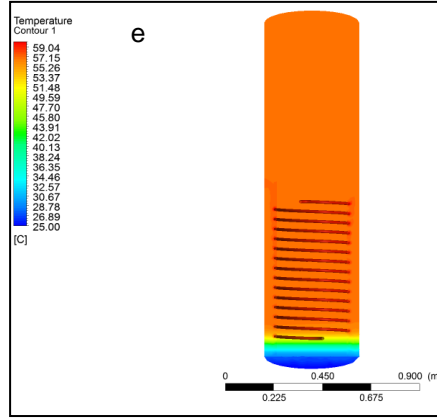
Zamana bağlı olarak yapılan sayısal çalışmada, 300 dakikalık şarj işleminde serpantine giren suyun giriş debisi 2,8 L/dak, sıcaklığı ise 70°C 'dir ve elde edilen veriler Şekil 6'de görülmektedir. Bu şekilde anlaşılacağı üzere deponun başlangıçta içindeki su sıcaklığı 19°C 'dedir. Şarj işlemi başladığı anda su ısınmaya başlamakta ve 60 dakika sonra ortalama sıcaklık $18,06^{\circ}\text{C}$ artarak $37,06^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. 120 dakika sonra ise ortalama sıcaklık $11,05^{\circ}\text{C}$ daha artarak $48,11^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşmıştır. 180 dakika sonra ise deponun ortalama sıcaklığı $6,53^{\circ}\text{C}$ artarak $54,64^{\circ}\text{C}$ olmuştur. 240'inci dakikaya gelindiğinde depodaki ortalama sıcaklık $4,38^{\circ}\text{C}$ daha artarak $59,02^{\circ}\text{C}$ olmuştur. 300 dakikalık şarj işleminin en sonunda ise deponun ortalama sıcaklığı $2,61^{\circ}\text{C}$ daha artarak $61,63^{\circ}\text{C}$ 'ye varmıştır. Şekil 6'ten de görüldüğü üzere deponun içerisindeki sıcaklık ortalamasının artışı zaman geçtikçe azalmaktadır. Bunun sebebi ise serpantin borusu içindeki suyun sıcaklığı ile deponun içerisindeki suyun sıcaklık farkının azalmasıdır. Ayrıca serpantin borusunun deponun 330 mm yüksekliğinden sonra hemen hemen üniform bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu şekilde deponun içerisindeki suyun yaklaşık %80'inin sıcaklık dağılımı homojendir.



Şekil 6. Deponun eksenindeki zamana bağlı sıcaklık değişimi ($T_{giriş}=70^{\circ}\text{C}$, $\dot{V}=2,8$ L/dak)

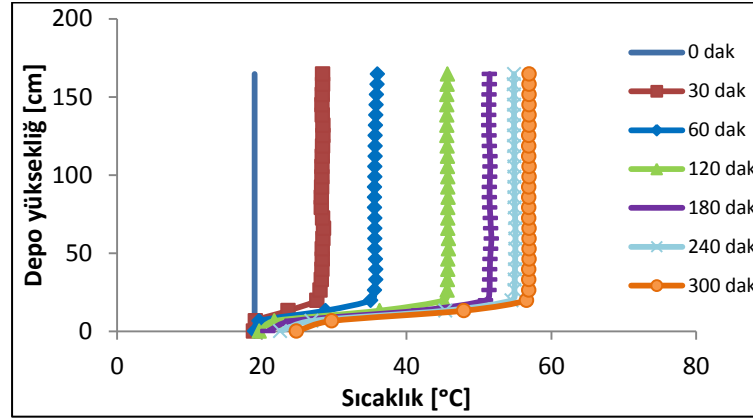
Şekil 7’de görülen sıcak su depolama tanklarının içindeki sıcak dağılımı z-r düzleminde çizilmiştir. Şekilde 60, 120, 180, 240 ve 300’ üncü dakikadaki depo içerisindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. İlk 60 dakikalık şarj işleminin süresi sonunda depo içerisindeki suyun sıcaklık dağılımının karmaşık olduğu görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere doğal taşınım ile serpantin boruları etrafında ısınan su kütleleri deponun üst kısmına ulaşmadan soğuk su kütleleri ile çarpışabiliyor. Deponun üst kısmına ulaşabilen sıcak su kütleleri ise orada oluşan girdap nedeniyle farklı yönlerde dağılıp soğuk su kütleleri ile karşılaşılıyor. Depo içerisinde oluşan bu olaylar nedeniyle ilk 60 dakikalık şarj süresinin sonunda homojen bir sıcaklık tabakalaşması elde edilememektedir. Fakat süre uzadıkça depo içerisindeki su ile serpantin borularındaki su arasında sıcaklık farkı azalmaktadır. Böylece depo içerisindeki su hemen hemen her noktada aynı sıcaklığa gelmekte ve sıcaklığa bağlı olarak su kütleleri arasındaki yoğunluk farkı azalmaktadır. Bu durumda depo içerisindeki su kütlelerinin doğal taşınım olan hareketlerinde yavaşlamalarına sebebiyet vermektedir. Bu şekilde ancak uzun şarj işlemleri sonunda depo içerisinde homojen sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir. Şekil 6 ile Şekil 7 arasındaki şekillerde 330 mm den aşağı olan bölgede ısıl tabakalaşmanın başladığı görülmektedir. Doğal taşınım olayında ısınan su kütleleri, yer çekimi ivmesinin aksine yukarıya doğru hareket ettiği için deponun alt kısmındaki hız vektörleri sıfıra yakın olmaktadır. Bu nedenle serpantin boruları ile deponun tabanı arasındaki kalan kısımda olan su kütlesi çok az bir miktarda ısınmaktadır.



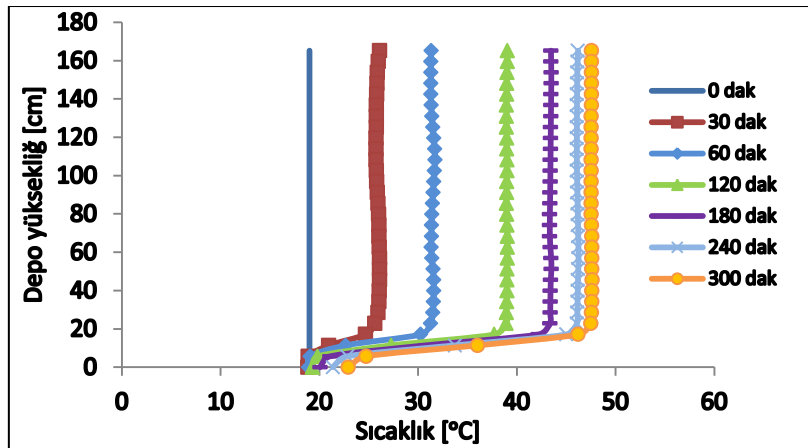


Şekil 7. Giriş kesitine dik orta eksen düzlemindeki sıcaklık dağılımı ($T_{giriş}=70\text{ °C}$, $\dot{V}=2,8\text{ L/dak}$)
a-60 dakika, b-120 dakika, c-180 dakika, d-240 dakika e-300 dakika

Şekil 8 ile Şekil 9 şarj işleminde serpantine giren suyun giriş debisi 2,8 L/dak, sıcaklığı ise 60 °C' ve 50°C'dir olup sıcaklık dağılımları verilmiştir.

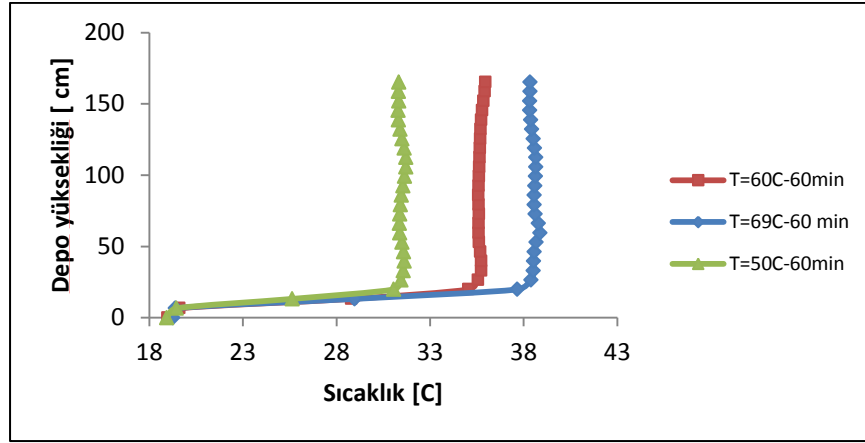


Şekil 8. Deponun eksenindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı ($T_{giriş}=60\text{ °C}$, $\dot{V}=2,8\text{ L/dak}$)



Şekil 9. Deponun eksenindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı ($T_{giriş}=50\text{ °C}$, $\dot{V}=2,8\text{ L/dak}$)

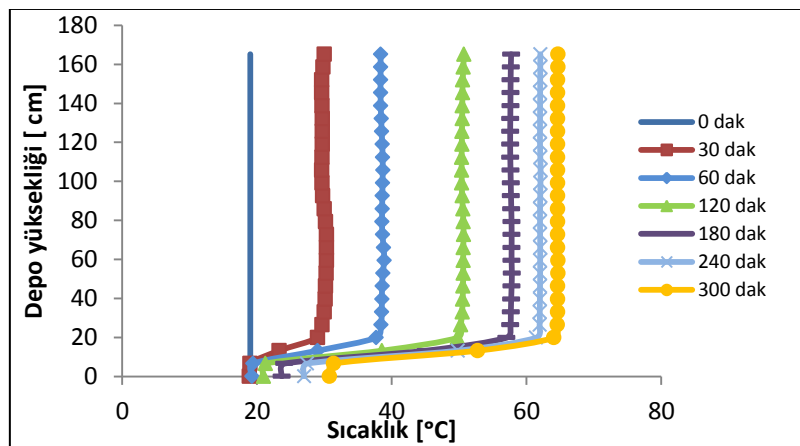
Şekil 10'den de görüldüğü üzere 60 dakikalık şarj işleminde farklı giriş sıcaklıklarının etkisine bakılırsa, şarj süresi sabit olduğunda giriş sıcaklığının artması sıcak su deposunda bulunan suyun daha fazla ısınmasına neden olmaktadır. Su giriş sıcaklığının artmasıyla sıcaklık akümülatör içinde arttığı, fakat bu artışın lineer olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 10. Farklı giriş sıcaklıklarındaki 60 dakikalık şarj işlemi için deponun eksenindeki sıcaklık dağılımı ($\dot{V}=2,8$ L/dak)

5.2 Şarj İşlemi Sabit Sıcaklıkta

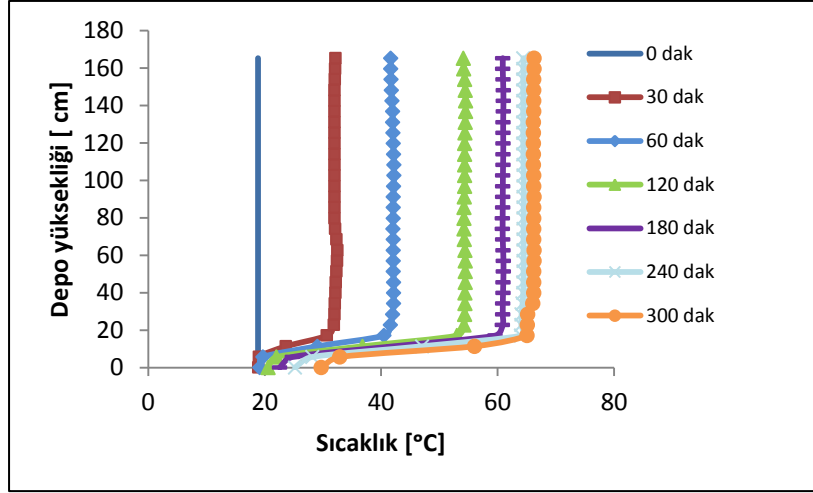
Zamana bağlı olarak yapılan sayısal çalışmada, 300 dakikalık şarj işleminde serpantine giren suyun giriş debisi 2,5 L/dak ve sıcaklığı 70 °C olarak alınmıştır. Fluent paket programı ile yapılan çözüm ve elde edilen veriler Şekil 11'de görülmektedir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere deponun başlangıçta içindeki su sıcaklığı 19 °C'dedir. Şarj işlemi başladığı anda su ısınmaya başlamakta ve 60 dakika sonra ortalama sıcaklık 17,65 °C artarak 36,65 °C'ye ulaşmıştır. 120 dakika sonra ise ortalama sıcaklık 11,09 °C daha artarak 47,75 °C'ye ulaşmıştır. 180 dakika sonra ise deponun ortalama sıcaklığı 6,81 °C artarak 54,57 °C olmuştur. 240'ıncı dakikaya gelindiğinde depodaki ortalama sıcaklık 4,27 °C daha artarak 58,85 °C olmuştur. 300 dakikalık şarj işleminin en sonunda ise deponun ortalama sıcaklığı 2,72 °C daha artarak 61,57 °C'ye varmıştır. Şekil 11'den de görüldüğü üzere deponun içerisindeki sıcaklık ortalamasının artışı zaman geçtikçe azalmaktadır. Değişen debinin sıcak su deposu içerisindeki ortalama sıcaklık farkına olan etkisini görebilmek için sabit sıcaklıkta ve değişik debilerde analizler yapılmıştır. Giriş debisi değerleri 2,8 L/dak ile 2,5 L/dak olarak seçilmiş ve 300 dakikalık şarj işlemleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara bakıldığında ise iki farklı çalışma sonunda depolarda bulunan ortalama su sıcaklıkları arasındaki farkın 0,06 °C olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Deponun eksenindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı ($T_{giriş}=70$ °C , $\dot{V}=2,5$ l/dak)

Şekil 12 'de şarj işleminde serpantine giren suyun giriş debisi 3,6 L/dak ve sıcaklığı 70 °C olarak alınmıştır. Giriş debisi değerleri 2,8 L/dak ile 3,6 L/dak ve 300 dakikalık şarj işlemleri için yapılan analizlerden çıkan sonuçlara bakıldığında iki farklı çalışma sonunda depolarda bulunan ortalama su

sıcaklıkları arasındaki farkın $1,82\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmüştür. $3,6\text{ L/dak}$ ve $2,5\text{ L/dak}$ debileri ile yapılan analizler sonucunda ise su depoları arasındaki ortalama sıcaklık farkı ise $1,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' dir.

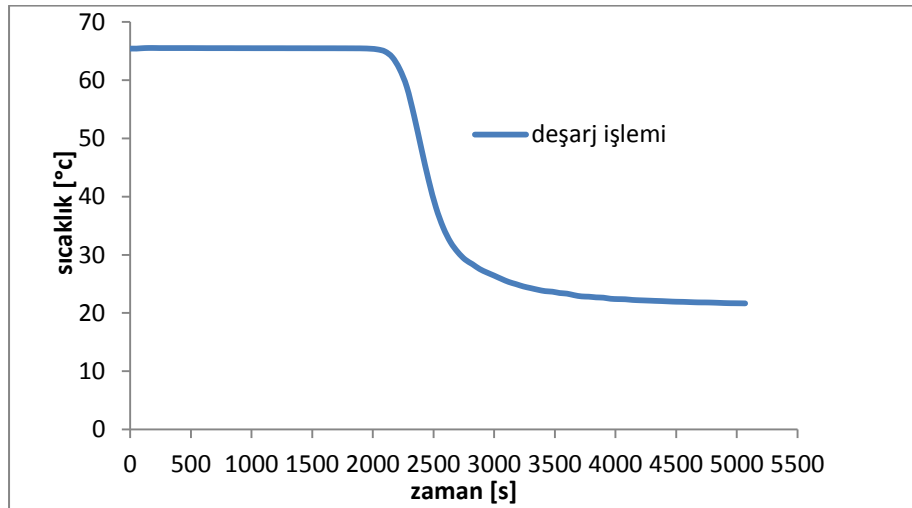


Şekil 12. Deponun eksenindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı ($T_{\text{giriş}}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{V}=3,6\text{ L/dak}$)

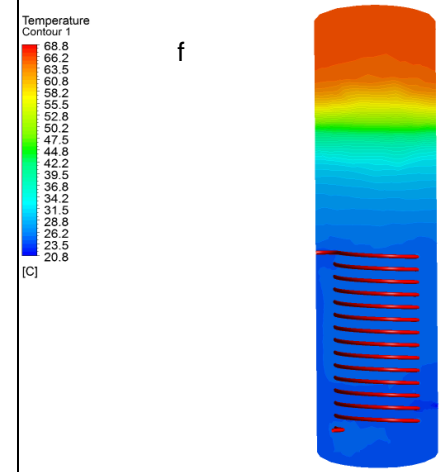
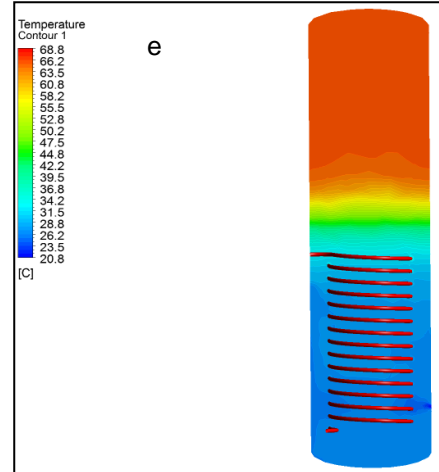
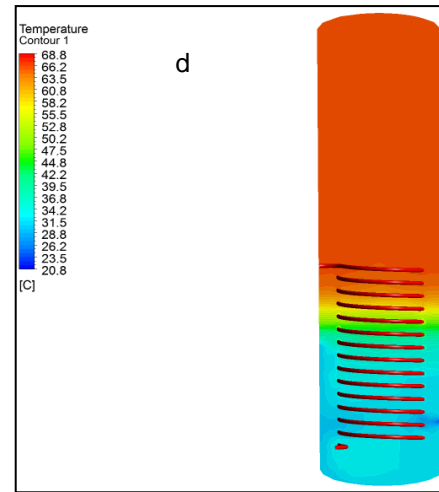
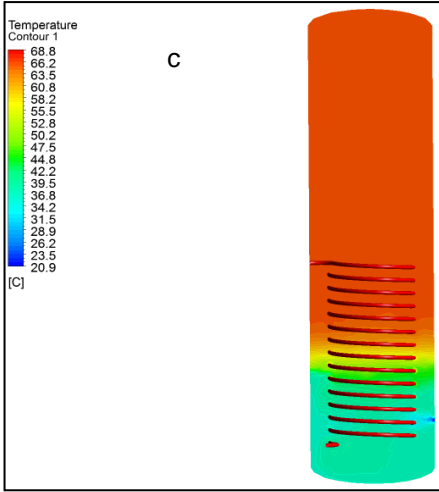
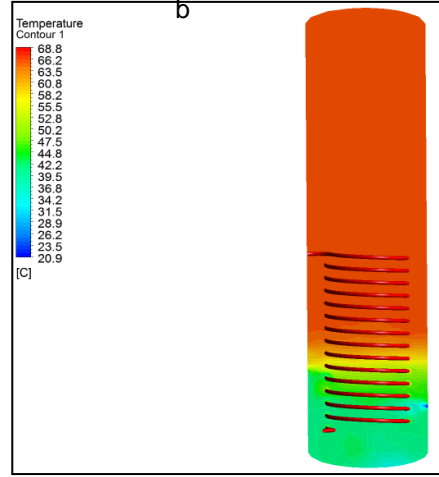
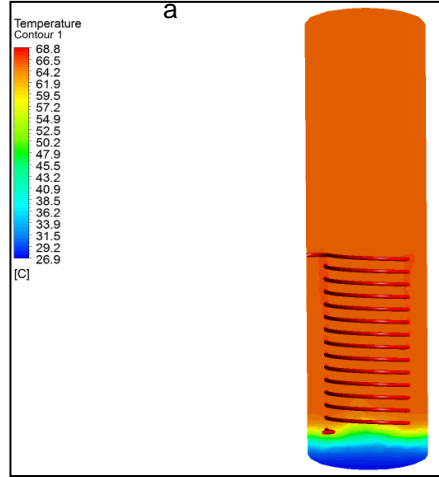
5.3 Deşarj İşlemi

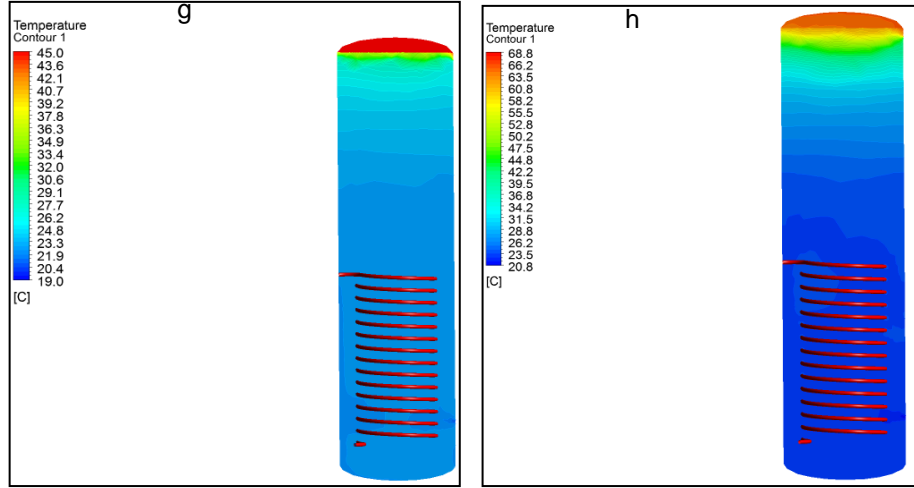
Zamana bağlı olarak yapılan sayısal çalışmada, deşarj işleminde depoya giren suyun giriş debisi 5 L/dak ve sıcaklığı ise $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak alınmıştır. Fluent paket programı ile yapılan çözüm ve elde edilen veriler Şekil 13'de görülmektedir. Şekil 14 'te sıcaklık dağılımı farklı zamanlarda, görüldüğü gibi burada ısı tabaklaşma kullanım esnasında bariyer gibi davranışta ve sıcak su bölgesin kurarak ve karışım yapmadan soğuk su bölgesiyle.

Şekil 1'5te deşarj işleminde depoya giren suyun giriş debisi 10 L/dak ve sıcaklığı ise $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak alınmıştır ve sıcaklık dağılımı kullanım esnasında görülmektedir.

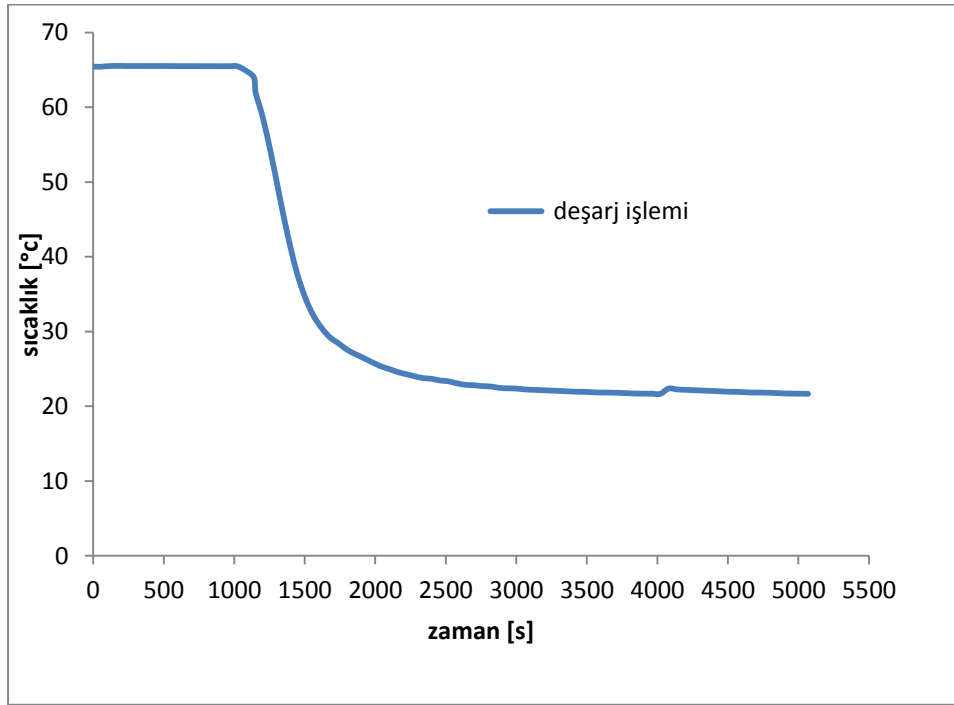


Şekil 13. Kullanım suyu çıkış sıcaklığının zamanla değişimi ($T_{\text{giriş}}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{V}=5\text{ L/dak}$)





Şekil 14. Kullanım esnasında depo içinde farklı anlardaki sıcaklık dağılımları. ($T_{giriş}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{V}=5\text{ L/dak}$)
a-0 dak, b-2,5dak, c-5dak, d-10dak,e-20dak, f-30dak g-40dak, h-50dak



Şekil 15. Deponun kullanım çıkışında zamana bağlı sıcaklık dağılımı ($T_{giriş}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{V}=10\text{ L/dak}$)

SONUÇ

Bu çalışmada, bir sıcak su tankında ısıl tabakalaşmanın sayısal yöntemle simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yöntem, Zachar vd. [10] tarafından daha önce incelenmiş bir problem ele alınarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu yöntem, 200 litrelik ticari bir sıcak su deposunun simülasyonu için kullanılmıştır. Şarj işlemlerinde sıcak suyun farklı giriş sıcaklık ve debileri iledeşarj işleminde ise

soğuk suyun iki farklı debisi için analizler tamamlanmıştır. Şarj işlemlerine ilişkin yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlardan, giriş debisi ile depo ortalama sıcaklığı arasında doğrusal olmayan bir ilişki görülmektedir. Buna ek olarak, giriş sıcaklığı ile depo ortalama sıcaklığı arasında da doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca, şarj işlemi sırasında, tabakalaşmanın deponun alt kısımlarında olduğu görülmüştür. Deşarj işleminde ise, kullanım debisinin artması, sıcaklık tabakalaşmasının bozulmasına sebep olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ABDOLY, M. A. and RAPP, D, Theoretical and Experimental Studies of Stratified Thermocline Storage of Hot Water, Energy Comvers. Mgmt Vol. 22, pp, 275 – 285 pp., 1982.
- [2] MO, Y. and MIYATAKE, O., Numerical Analysis of The Transient Turbulent Flow Field in a Thermally Stratified Thermal Storage Water Tank, Numerical Heat Transfer, Part A, 30, 649-667 pp, 1996.
- [3] HALLER, M. Y., CYNTHIA A. C., STREICHER ,W., HARRISON, S.J., ANDERSEN, E.and FURBO, S, Methods to Determine Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Processes- Review and theoretical comparison, Solar Energy ,83 , 1847–1860 pp., 2009.
- [4] GECZY, P. and FARKAS, İ, Neural Network Modelling of Thermal Stratification in a Solar DHW Storage, Solar Energy, 84, 801–806 pp., 2010.
- [5] DARCI, L. S., VIELMO, H. A. and KREZINGER, A., Three-Dimensional Analysis and Investigation of The Thermal and Hydrodynamic Behaviors of Cylindrical Storage Tanks, Renewable Energy, 36, 1364-1373 pp, 2011.
- [6] PEKTEMİR, İ. Z., Mantolu Sıcak Su Tanklarında Sıcaklık Tabakalaşmasının İncelenmesi, MSc Tezi, , Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2011
- [7] DEVORE, N., YIP, H. and RHEE, J., Domestic Hot Water Storage Tank Design and Analysis for Improving Thermal Stratification, 2013.
- [8] TAHERI, H., Numerical Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Applied in Adsorption Heat Pump Cycle, PhD thiese, 2014.
- [9] PINEL, P., CYNTHIA, A. C. and WILLS, A, A Review of Available Methods for Seasonal Storage of Solar Thermal Energy in Residential Applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 3341– 3359 pp, 2011.
- [10] ZACHAR, A., FARKAS, İ. and SZLIVKA, F, Numerical Analyses of the İmpact of Plates for Thermal Stratification İnside a Storage Tank With Upper and Lower İnlet Flows, Solar Energy, 74, 287-302 pp, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Wahby Kanbar JABER

1976 yılı Kerkük- Irak doğumludur. 1998 yılında Technology Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi uçak Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2005 yılında Yüksek Mühendis ve Ege Üniversitesinden 2014 yılında Doktor unvanını almıştır. 2005-2007 Yılları arasında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır, 2008-2010 Kerkük üniversitesi mühendislik fakültesin dekan yardımcısı olarak görev yapmıştır. 2005 yılından beri Kerkük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümü Enerji Dalı'nda Yrd. Doç. Olarak görev yapmaktadır. Aerodinamik, Akışkanlar mekaniği ve enerji depolama konularında çalışmaktadır.

**Utku ŞENTÜRK**

1980 yılı Denizli doğumludur. 2004 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2007 yılında Yüksek Mühendis ve 2011 yılında Doktor unvanını almıştır. 2005-2013 Yılları arasında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2013 yılından beri Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Yrd. Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. Akışkanlar mekaniği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, dalga enerjisi konularında çalışmaktadır.

Aytunç EREK

1966 yılı İzmir doğumludur. 1989 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Termodinamik ABD' dan 1993 yılında yüksek lisans ve 1999 yılında doktora derecelerini almıştır. 2014 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Prof. unvanını alarak, görevine devam etmektedir. Sayısal akışkanlar mekaniği, faz değişimli ısı transferi uygulamaları, katı modelleme ve ısı analiz konularında çalışmaktadır.

Ali GÜNGÖR

1955 Elazığ doğumlu, evli ve iki kız çocuk babasıdır. Ege Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1977 yılında Mühendis, 1978 yılında Yüksek Mühendis ve aynı Üniversitenin Güneş Enerjisi Enstitüsü'nden 1985 yılında Doktor Mühendis derecelerini aldı. 1986 yılında Kanada'da Brace Research Institute'de altı ay araştırmalarda bulundu. 1989 yılında Isı ve Madde Transferi Bilim Dalında Doçent oldu. 1996 yılında Ege Üniversitesinde Profesör oldu. 1978 yılından beri değişik Üniversite içi kurumlarda DEU Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü ve Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümlerinde çalıştı. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde 1997-2012 yıllarında Bölüm Başkanlığı yaptı. Halen Aynı bölümde Termodinamik Anabilim Dalı başkanıdır. Çalışma konuları iklimlendirme, güneş enerjisi ısı uygulamaları, soğutma tekniği, absorpsiyonlu ve adsorpsiyonlu soğutma teknolojileri, kurutma tekniği, ısı boruları, termodinamik: ısı ve madde transferi uygulamalarıdır.

